

(25) 大規模節理性岩盤モデルによる空洞掘削時の岩盤挙動に関する実験的研究
BEHAVIOUR OF JOINTED ROCK MASSES AROUND AN UNDERGROUND OPENING
UNDER EXCAVATION USING LARGE-SCALE PHYSICAL MODEL TESTS

永井哲夫*・田中典明**・國村省吾***・孫 建生*・朱 維申****
Tetsuo NAGAI, Noriaki TANAKA, Shogo KUNIMURA, Jiansheng SUN and Weishen ZHU

In order to carry out rational design and construction of large-scale underground openings in jointed rock masses, it is important for engineers to evaluate the properties of rock joints and those effect on the mechanical behaviour of rock masses and to establish a scientific method which is capable of characterizing them. Therefore, in this paper, the authors study the mechanical behaviour of jointed rock masses around an underground opening under excavation using large-scale physical model tests firstly. The size of this model is 180 × 140 × 15cm, containing two sets of orthogonal joints. During these tests, careful monitoring is performed by means of two types of non-contact deformation measuring systems, based on image processing technique.

1. はじめに

岩盤を対象として大規模地下空洞を掘削する際、節理などの不連続面の影響により岩盤挙動の予測や最適な支保の評価が困難になることがある。このような場合、空洞周辺岩盤の挙動は、主に節理の幾何学および力学特性に支配されていると考えられる¹⁾。そこで、合理的な設計や施工を行うためには、節理などの不連続面の諸特性およびそれが岩盤挙動に及ぼす影響を把握した上で、それらを的確に表現できる解析手法を構築することが必要となる。

本研究では、まず節理性岩盤における空洞掘削に伴う岩盤挙動を把握する目的で、石膏ブロックを積層した二次元大規模節理性岩盤モデルにより空洞の掘削実験を行う。実験においては、ブロックの大きさ、積層角度および周辺拘束圧を制御して、節理の間隔や角度および初期応力場を表現している。また、変位計測に際しては、画像処理装置による2種類の非接触変位計測システムを構築することにより、空洞周辺における岩盤モデルの変形挙動を二次元的にそれぞれ多点で捉えている。ここでは、まず実験装置、供試体および実験方法を要約して述べ、次に新しい計測システムの概要および計測変位の精度に関する検討結果を示し、最後に掘削実験により得られた空洞周辺の節理性岩盤モデルの挙動に関する知見をまとめる。

* 正会員 博士(学術) (株)青木建設 研究所
** 正会員 東京電力(株) 電力技術研究所
*** 正会員 (株)青木建設 研究所
**** 工学博士 中国科学院 武漢岩土力学研究所教授

2. 実験概要

著者らは、これまでの研究において、岩盤不連続面のせん断特性の応力依存性を考慮することにより、不連続性岩盤の力学的挙動や不連続性岩盤におけるロックボルトやPSアンカーの補強効果などの表現を試みてきた^{2)・3)}。そして、節理性岩盤において空洞を掘削する場合、その力学的挙動に大きな影響を及ぼす要因として、節理の間隔や角度および空洞周辺岩盤に作用する応力場が挙げられることを示した^{2)・4)}。そこで本研究では、これらの要因が岩盤挙動に及ぼす影響を把握するため、二次元節理性岩盤モデルによる空洞の掘削実験を行った。

2.1 実験装置

本研究では、大規模節理性岩盤モデルにより空洞の掘削実験を行うため、写真-1に示すような高剛性大型二軸載荷実験装置を用いた。この装置は、外寸が高さ275cm、幅335cm、奥行き30cm、内寸が高さ215cm、幅205cm、奥行き30cmの載荷枠に、容量5tonfの油圧ジャッキを左右側部に各8基、上部に6基それぞれ等間隔で設置したものである。そして、側部および上部の各ジャッキはそれぞれ別々に2台の手動ポンプと連結されており、両ポンプの圧力を制御することにより岩盤モデルに任意の周辺拘束圧を作用させている。また、各方向の油圧ジャッキと岩盤モデルの間にはそれぞれ鋼製の載荷板（左右側部：高さ179cm、幅8cm、奥行き15cm、上部：高さ8cm、幅138cm、奥行き15cm）を設置し、載荷板と岩盤モデルの摩擦の影響を除去するためテフロンシートを両者の間に挿入している。そのため、本実験において岩盤モデルの外側境界条件は変位一定となっている。

2.2 供試体

写真-1のように高さ180cm、幅140cm、奥行き15cmの岩盤モデルを作製するため、高さ8cm、幅4cm、奥行き15cmまたは高さ4cm、幅2cm、奥行き15cmの石膏ブロックを積み上げた。このとき、節理の角度が $45^\circ / 135^\circ$ または $30^\circ / 120^\circ$ となるようにブロックの積層角度を調整し、外側境界および空洞境界部のブロックについてはそれぞれの形状に合わせて加工したものをを用いている。空洞は岩盤モデルの中央部に設置され、その寸法は高さ32cm、幅16cm、奥行き15cmである。なお、ここでは石膏ブロックの配合を石膏：細砂：水=3：5：2（重量比）としており、その基本物性値は表-1に示すようになっている。

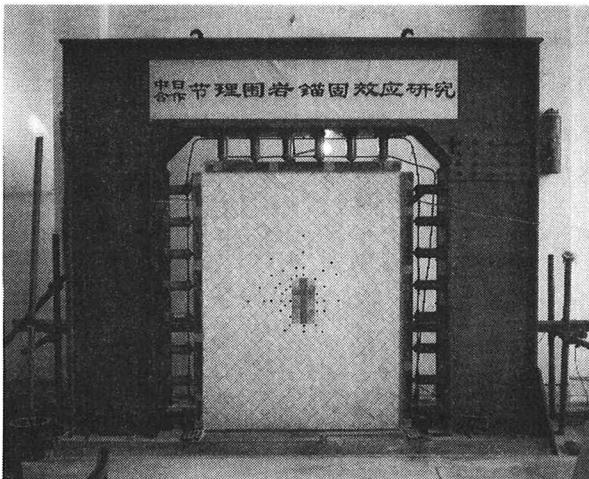


写真-1 高剛性大型二軸載荷実験装置

表-1 石膏ブロックの基本物性値

項目	試験値
単位体積重量 (gf/cm^3)	1.45
一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	68 ~ 95 (78.9)
弾性係数 (kgf/cm^2)	$1 \sim 2 \times 10^4$ (1.58×10^4)
ポアソン比	0.15

※下段 () 内は試験の平均値

2-3 実験方法

ここでは、節理の間隔や角度および初期応力場を表現するため、石膏ブロックの大きさ、積層角度および周辺拘束圧を制御因子として取り上げ、表-2に示すような組み合わせで実験を行った。実験の手順は、まず所定の周辺拘束圧まで油圧ジャッキを用いて載荷し、次に周辺拘束圧を保持した状態で空洞の掘削を三段階に分割して行い、各掘削段階の前後に非接触変位計測システムにより空洞周辺における岩盤モデルの挙動を計測するというものである。空洞の掘削に際しては、写真-2に示すようにあらかじめ空洞部分に設置しておいた木製ブロックを掘削段階に応じて除去している。このとき、鋼製のくさび形ブロックにグリースを塗布して反対向きに重ね合わせたものを木製ブロックの中央部に設置し、これをハンマーで軽く叩いて取り外すことにより、スムーズに木製ブロックの除去を行えるようにしている。また、計測に際しては、空洞周辺の岩盤モデルの表面に貼付した計測用ターゲットをCCDカメラまたは光学カメラにより撮影し、画像処理技術を応用して変位計測値を求めている。

表-2 実験条件

節理間隔 (cm)	節理角度 (°)	周辺拘束圧 (kgf / cm ²)		計測
		鉛直	水平	
4 × 8	45 × 135	5 5	5 10	C
	30 × 120	5 5	5 10	
2 × 4	45 × 135	5 5	5 10	D
	30 × 120	5 5	5 10	
2 × 4	45 × 135	1 2.5	5 5	光学
	30 × 120	1 2.5	5 5	

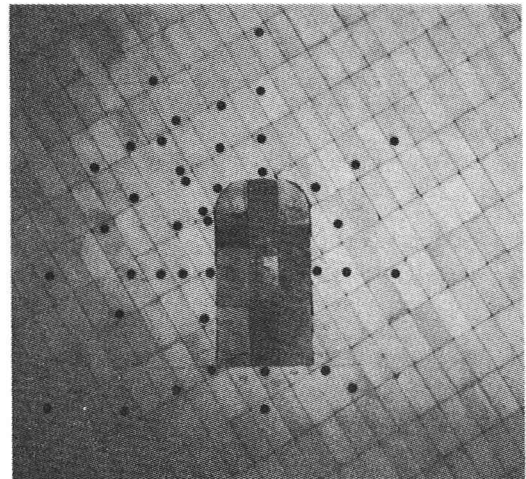


写真-2 空洞部およびその周辺の状況

3. 非接触変位計測システム

これまでの研究から、空洞掘削時に節理性岩盤は節理の影響を受けて不連続体として挙動することが分かっている^{1), 3), 5)}。そこで、今回のように大規模節理性岩盤モデルの掘削実験を行う場合、二次元的にできるだけ多くの点で岩盤モデルの挙動を把握する必要がある。それに対して、ダイヤルゲージやひずみゲージなどの接触型の変位計測では十分なデータを得ることは困難であるため、画像処理装置による2種類の非接触変位計測システムを構築した。本章では、それぞれの概要および計測変位の精度についてまとめて示す。

3-1 CCDカメラによる計測

まず、架台に上下直列に固定した2台のCCDカメラ(オムロン製、形3Z4SP-S1)により約40個の計測用ターゲット(直径15mmの黒円シール、写真-2参照)を直接撮影する。次に、視覚コントローラ(オムロン製、形3Z4SP-C11)により、各ターゲットの回りにウィンドウを設定して計測範囲を指定し、各入力画像の2値化および重心位置(円の場合は中心位置に一致)の算定を行う。そして、初期状態の重心位置と各掘削段階の重心位置の差を求めて計測変位とする。このとき、カメラ視野内に設定したスケールをもとにカメラ座標から実際の寸法への変換を行っている。以上の操作をプログラム化することにより、パソ

コンで計測の制御、画像データの収集および変位の算定までを自動的に行えるようなシステムを構築した（図-1）。このような画像処理装置では、重心位置の算定が画素単位で行われることから、計測される変位の精度は1画素に割り当てた実際の寸法とターゲットの大きさにより決まる。本システムの場合、変位の精度は0.3mm程度となっている。なお、実験に際しては、本システムで得られる計測変位をチェックする目的でダイヤルゲージによる一次元計測を合わせて実施している。

3-2 光学カメラによる計測

CCDカメラによる計測システムを用いて表-2に示すような実験を行ったところ、空洞周辺の岩盤ブロックは崩落して大きな変位を示すものと、崩落せずに非常に小さい変位（0.01～0.5mm）しか示さないものに分かれた。そこで、後者の変位を計測するためには、計測変位の精度を向上させることが必要となった。それに対して、光学カメラにより直接撮影した画像を拡大して印画紙に焼き付け、それをCCDカメラにより細分して撮影し図-1と同様のシステムを用いて変位計測値の算定を行った。光学カメラで撮影する際、空洞の左右両側にそれぞれ約160個の計測用ターゲット（直径9mmの黒円シール）を集中的に貼付し、その1cm手前側にそれぞれ約50個のターゲットを貼付した不動点枠を設置している（写真-3参照）。そして、CCDカメラにより画像処理を行う際、各ターゲットとその近傍の不動点との重心位置の差を求めて計測変位としている。事前に行った計測変位の精度に関する検討結果を見ると、本システムによる変位の精度は0.05mm程度となっている。なお、ここでは本システムの計測変位をチェックするため、ダイヤルゲージによる二次元計測を合わせて実施している。

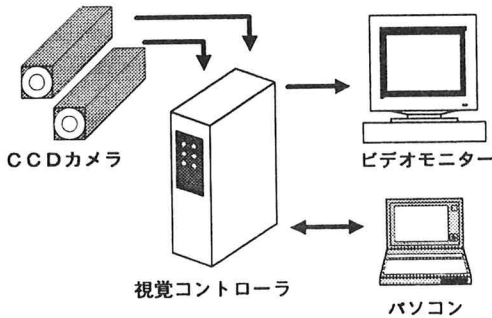


図-1 CCDカメラによる計測システム

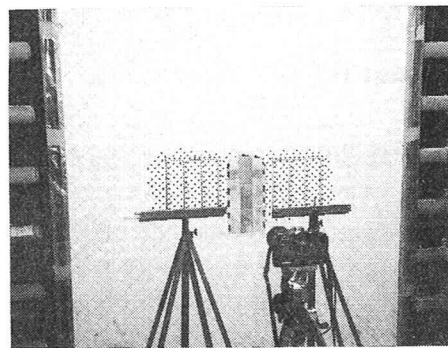


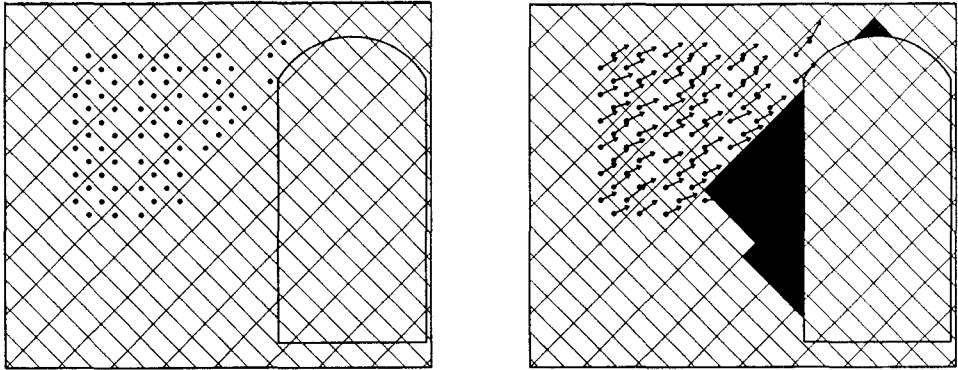
写真-3 光学カメラによる計測状況

4. 実験結果および考察

ここでは、非接触変位計測システムやダイヤルゲージにより得られた計測結果および実験中の岩盤モデルに関する観察結果などから、空洞周辺における岩盤モデルの挙動について総合的に行った考察をまとめて示す。ただし、CCDカメラによる計測結果に関しては、精度的に信頼できる数値のみを検討に用いている。

- ① 空洞の形状を弾頭型にしたことから側壁部は鉛直となっており、岩盤ブロックの崩落のほとんどは側壁部で発生している。アーチ部における崩落はほとんど見られないかまたは小さい岩盤ブロックが崩落するのみであった（図-2参照）。このとき、崩落する領域の大きさや形は、主としてブロックの大きさおよび積層角度により異なっていた。
- ② 空洞周辺で崩落しなかった岩盤ブロックの変位を見ると、岩盤ブロックの変形よりもブロック間の変位が大部分を占めている。つまり、局所的には不連続体として挙動している。しかし、計測された変位は0.01～0.5mmと非常に小さく、巨視的には連続体的な挙動をしていると見なせることから、等価な連続体としてその挙動を評価できると考えられる。

- ③ アーチ部の上部の岩盤モデルにおいては、変位のほとんどが第一段階掘削直後に生じており、一方、側壁部の側方の岩盤モデルにおいては、変位のほとんどが最終段階掘削直後に発生している。
- ④ ブロックの直交した二面に作用する垂直応力が掘削に伴って除荷されるような場合、そのブロックは大きな変位を生じて最終的には崩落する。



(a) 掘削前 (計測用ターゲットの位置) (b) 最終段階掘削後 (計測変位を1.6倍に拡大表示)

図-2 光学カメラによる計測結果 (空洞左側)

(間隔 $2 \times 4\text{cm}$ 、角度 $45 \times 135^\circ$ 、周辺拘束圧：鉛直 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ および水平 $5\text{kgf}/\text{cm}^2$)

5. おわりに

本実験は、岩盤不連続面の諸特性を考慮して著者らが開発した節理性岩盤の力学的挙動の解析手法^{2), 3)}に関して、その妥当性を検証するという目的で実施されたものである。そして、それに応じた実験結果を得ることができたことから、現在上述の解析手法によりシミュレーションを実施中である。本文では、誌面の関係上、実験結果および考察の一部を示すにとどめたが、実験結果をさらに詳細に分析した上で解析によるシミュレーションの結果と合わせて、今後別の機会に発表する予定である。

最後に、本実験に際してご協力いただいた中国科学院武漢岩土力学研究所の関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

6. 参考文献

- 1) 池尻 健・國村省吾・永井哲夫：大規模地下空洞掘削に伴う周辺岩盤の挙動に関する一考察，第2回岩盤システム工学シンポジウム講演論文集，pp.27-30，1994.
- 2) 永井哲夫：ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の力学的挙動に関する研究，神戸大学学位論文，1992.
- 3) 東京電力株式会社・株式会社青木建設：不連続性岩盤掘削時の支保工評価手法の研究，平成5年度共同研究報告書，1994.
- 4) Zhu, W. and Wang, P.: Finite element analysis of jointed rock masses and engineering application, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, No.5, pp.537-544, 1993.
- 5) 打田靖夫・吉田次男・浦山 克：大規模地下空洞掘削時の不連続性岩盤の挙動，電力土木，No.256，pp.65-72，1995.